

Prozessmodellierung bei der Herstellung von Silizium- Einkristallen

Mühlbauer, Alfred

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 52, 2002,
S.105-123



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Prozessmodellierung bei der Herstellung von Silizium- Einkristallen¹

von A. Mühlbauer, Hannover*

(Eingegangen am 07.11.2002)

Einführung

Nahezu alle Halbleiterbauelemente werden heute aus einkristallinem Silizium(Si) hoher Perfektion hergestellt. Bei der fundamentalen Bedeutung moderner Elektronik in allen Bereichen des Lebens ist Silizium damit zum wichtigsten Werkstoff unserer Zeit geworden. Diese Tatsache führte gelegentlich dazu, dass ernst zu nehmende Zeitgenossen vom "Silizium- Zeitalter " sprechen, so wie man andere Perioden der Entwicklungsgeschichte auch mit bestimmten Werkstoffen verbindet und kennzeichnet.

Siliziumeinkristalle werden durch Umwandlung von hochreinem polykristallinen Ausgangsmaterial als nahezu zylinderförmige Stäbe hergestellt. Diese hochreinen und hochperfekten stabförmigen Kristalle werden nach Abtrennung der Anfangs- und Endkonen rundgeschliffen, in Scheiben zersägt, die ihrerseits je nach Anforderung der Halbleiterhersteller unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen unterzogen werden. Auf diesen so entstandenen Wafern werden dann mittels hochkomplexer Prozesse diskrete Bauelemente und integrierte Schaltungen produziert.

Etwa 95% der Si-Einkristalle werden gegenwärtig nach dem *Czochralski* (CZ)- Verfahren aus dem Tiegel gezogen, während der verbleibende Anteil nach dem *Floating-Zone* (FZ)-Verfahren tiegelfrei hergestellt wird. CZ- Si wird vorwiegend für die Produktion mikroelektronischer Schaltkreise verwendet, FZ-Si hingegen für leistungselektronische Bauelemente.

Der in der Industrie anhaltende Trend zur Vergrößerung der Waferfläche und damit der Einkristalldurchmesser von heute 300 mm für CZ- und 200 mm für FZ-Material ist mit einer ganzen Reihe von großen Herausforderungen verbunden. Eine rein empirische, vorwiegend auf Experimente gestützte Weiterentwicklung der Einkristall-Ziehverfahren ist wegen der sehr komplexen gegenseitigen Abhängigkeit der Züchtungsparameter und wegen der hohen Anforderungen an die strukturelle Perfektion sehr schwierig, zeitraubend und damit auch besonders teuer. Hier bietet die mathematisch- physikalische Modellierung ein hervorragend geeignetes Mittel über die numerische Nachbildung der Züchtungsprozesse die Verfahrensentwicklung signifikant zu unterstützen. Es lassen sich die Einflüsse zusätzlicher und neuartiger Maßnahmen vorherzubestimmen, geeignete Modellketten entwickeln und damit Hinweise auf eine optimierte Züchtung von Einkristallen mit großen Durchmessern liefern.

* Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c.Alfred Mühlbauer · Westerfeldweg 44 · D-30900 Wedemark

¹ Vortrag gehalten vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 19.04.2002 in Braunschweig.

1. Czochralski- Prozess

In der Mikroelektronik ist die Entwicklung der Schaltkreise durch eine permanente Verkleinerung der Strukturgrößen auf derzeit $0,09\ \mu\text{m}$ gekennzeichnet, die eine höhere Packungsdichte und damit eine Steigerung der Bauelemente je Chip ermöglicht. 2010 werden 5 Milliarden Transistoren auf einem einzigen Chip integrierbar sein. Eine weitere Erhöhung der Produktivität wird in der Halbleiterindustrie daher u.a. vom Übergang auf größere Waferdurchmesser erwartet. Gegenwärtig erfolgt in der Industrie der Übergang bei der Kristallzüchtung von 200 mm- Kristallen auf solche mit einem Durchmesser von 300 mm (Bild 1). Dies ist gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der Tiegeldurchmesser der Anlagen von 24“ auf 32“ bis 36“. Damit steigt auch die Siliziumeinwaage von 120 kg auf mehr als 300 kg an. Das hat Konsequenzen für die Regelbarkeit des Czochralski-Prozesses (Bild 2), und wegen der mit der Erstarrungsfläche ansteigenden Kristallisationswärme auch Folgen für die maximal erreichbare Ziehgeschwindigkeit der Einkristalle. Daneben wird es zunehmend schwieriger, die wegen der sehr kleinen Strukturgrößen immer höheren Ansprüche hinsichtlich der tolerierbaren Kristalldefekte und der Sauerstoffkonzentration und -Verteilung in den Wafern zu erfüllen. Diese hohen Ansprüche an die Kristallqualität gehen einher mit der Forderung nach einem wirtschaftlichen Züchtungsprozess, für den die Ziehgeschwindigkeit des Kristalls das entscheidende Maß ist. Sie können mit der bisherigen Züchtungstechnologie nicht erfüllt werden. Neben der angepassten thermischen und konstruktiven Auslegung der neuen Ziehanlagen werden vor



Bild 1: 300 mm CZ- Einkristall

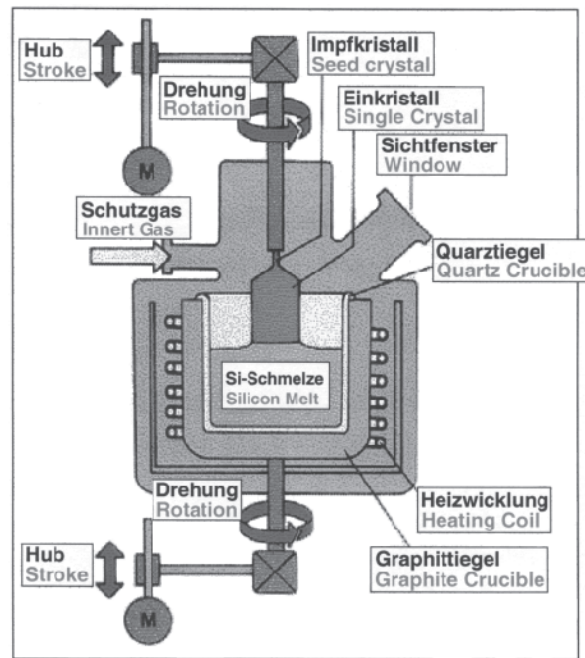


Bild2: Czochralski- Ziehanlage, schematisch

allein von einer externen, kontaktlosen Beeinflussung des Wärme- und Stofftransports in der Si- Schmelze durch elektromagnetischer (EM) Felder zusätzliche Möglichkeiten zur Prozessgestaltung erwartet. Gegenwärtig kann die Schmelzenströmung nur durch die Rotation des Tiegels und des Kristalls, durch den Argongasstrom und den Argondruck in der Ziehanlage sowie durch die Auslegung des Strahlungsschirms zwischen Schmelze und Kristall (Bild 3) beeinflusst werden.

Die magnetfeldinduzierte Konvektion beeinflusst über die sich in der Schmelze einstellenden Temperatur- und Strömungsfelder den Züchtungsprozess. Mit der Kenntnis dieses Einflusses wird es möglich, geeignete Magnetfeld- Konfigurationen zu bestimmen, welche die geforderten Ansprüche hinsichtlich Kristallausbeute und Kristallqualität erfüllen. Prinzipiell kommen hierfür sowohl magnetische Gleichfelder wie auch magnetische Wechselfelder in Betracht (Bild 4). Die Nachteile der Gleichfelder überwiegen deren Vorteile. Hingegen werden die Vorteile der Wechselfelder wegen der Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Schmelzenströmung bei geringen magnetischen Flussdichten durch die von der Strömungsgeschwindigkeit unabhängigen Lorentz-Kräfte als so bedeutsam eingestuft, dass nachfolgend ausschließlich Wechselfeldanordnungen untersucht werden [1]. Sie werden für den genannten Zweck als geeignet angesehen und die entsprechenden Magnetfeldspulen kommen für den Einbau in industrielle CZ- Anlagen in Betracht.

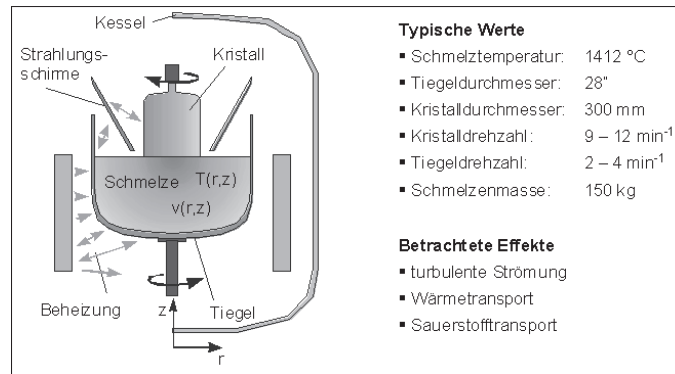


Bild 3: CZ- Anordnung, schematisch

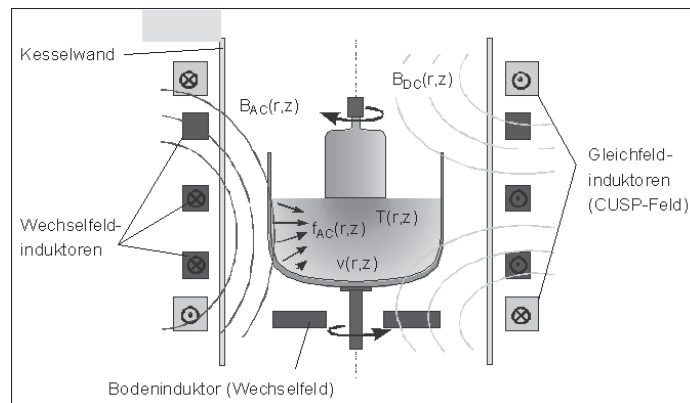


Bild 4: Anwendung elektromagnetischer Felder beim CZ- Prozess

1.1 Modellierung und Simulation

Für die numerische Analyse der komplexen Vorgänge in der Si- Schmelze müssen zunächst die mathematischen Modelle zur Beschreibung der einzelnen Felder miteinander gekoppelt werden. Die so entstehende Modellkette (Bild 5) besteht aus einzelnen Modulen, zu denen die Randbedingungen ebenso zählen wie die Berechnung der elektromagnetischen Felder und der Lorentz- Kräfte, der thermischen und turbulenten Größen in der Schmelze sowie der Sauerstoffverteilung. Sie lässt auch erkennen, dass die gekoppelte Berechnung der turbulenten Strömung und des Wärmetransports in der Schmelze die zentrale Aufgabe darstellt. Alle Berechnungen erfolgten in axialsymmetrischer, also zweidi-

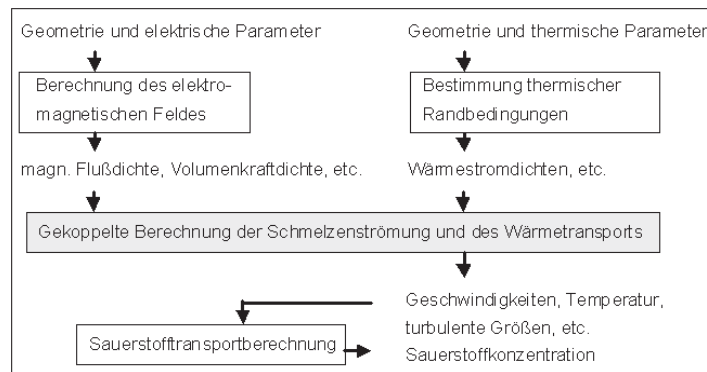


Bild 5: Modellkette

mensionaler Näherung, was die tatsächliche Züchtungssituation mit rotierendem Tiegel und gegensinnig rotierendem Einkristall hinreichend genau widerspiegelt. Berücksichtigt wurden die Tiegel- und Kristalldrehung, der thermische Auftrieb, die Marangoni- Konvektion und der elektromagnetische Antrieb über Wechselfelder (Bild 6). Ein besonderes Problem stellt die mathematische Behandlung der stark turbulent strömenden Schmelze dar, mit einer Grashofzahl von 10^{10} für den 32"- Tiegel. Verschiedene Turbulenzmodelle wurden untersucht und schließlich eine LowReynolds- Formulierung des k- ϵ -Modells ausgewählt, dessen Eignung nachgewiesen werden konnte [1].

Das Programmsystem wurde eingehend anhand von Vergleichen mit Versuchsergebnissen aus einer CZ-Laboranlage (Bild 7) getestet, die mit einer niedrig schmelzenden InGaSn-

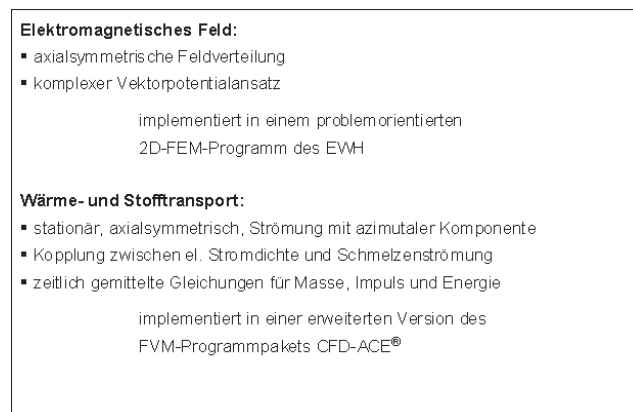


Bild 6: Modelle mit numerischer Umsetzung

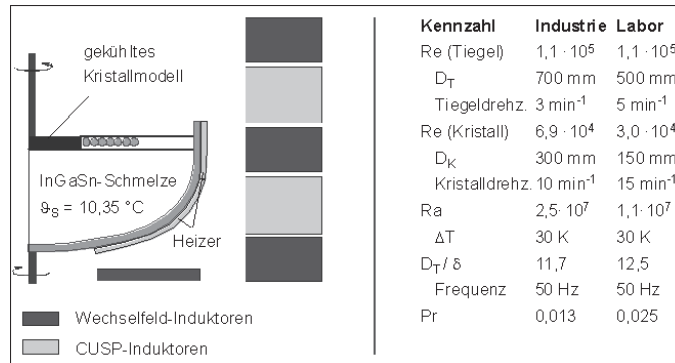


Bild 7: Laboraufbau zur Verifikation (Institut für Physik, Universität Lettlands, Salaspils)

Legierung betrieben wird [2]. Gemessen wurde u.a. die radiale Temperaturverteilung knapp unterhalb des Modell-Kristalls und der freien Schmelzenoberfläche. Diese experimentellen Ergebnisse wurden mit entsprechenden Berechnungsergebnissen verglichen (Bild 8). Ebenfalls untersucht wurde die radiale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit abhängig von der Schmelzentiefe (Bild 9). Als Ergebnis der Verifikation ist festzuhalten:

- Die Temperaturverteilungen werden tendenziell gut nachgebildet mit Abweichungen von wenigen K;
- Bei den Geschwindigkeitsverteilungen sind Abweichungen zwar vorhanden, der mittlere Massentransport wird dennoch gut modelliert.

Die entwickelten Simulationswerkzeuge sind somit für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen der Vorgänge in der Schmelze von industriellen CZ- Anlagen als geeignet anzusehen.

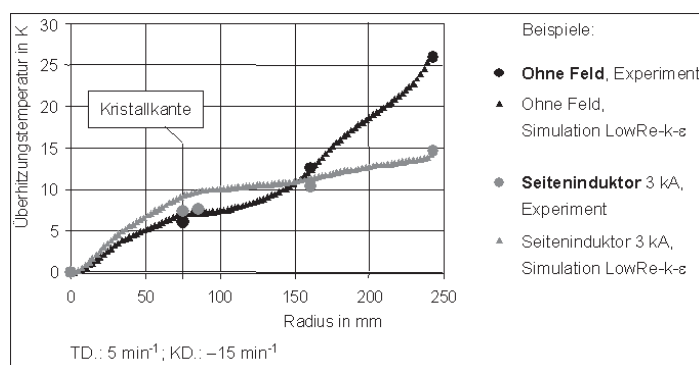


Bild 8: Verifizierte Temperaturverteilung

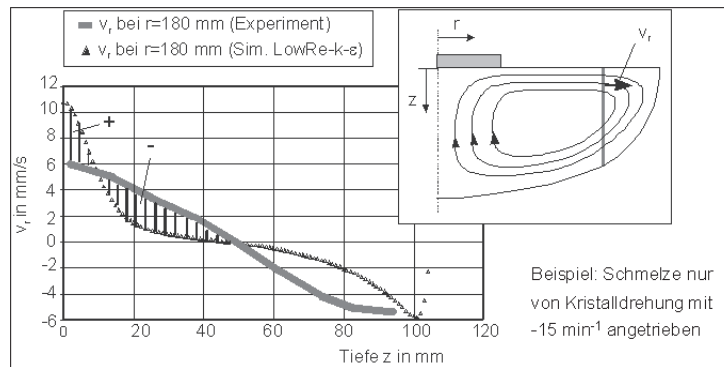


Bild 9: Verifizierte Geschwindigkeitsverteilung

1.2 Ergebnisse

Als Vergleichsfall werden die Ergebnisse der Simulation für den konventionellen CZ-Prozess herangezogen, der ohne elektromagnetische Felder betrieben wird, und bei dem die Strömungsstruktur durch das verwickelte Zusammenspiel von thermischem Auftrieb sowie Tiegel- und Kristalldrehung bestimmt ist. Das sich in der Schmelze einstellende Temperaturfeld ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von konvektivem Wärmetransport und Wärmeleitung, wobei in letzterer auch turbulente Anteile enthalten sind. Bild 10 lässt den Einfluss der Tiegeldrehzahl auf die meridionale Auftriebsströmung und die Temperaturverteilung erkennen. Mit zunehmender Tiegeldrehzahl zerfällt der an der Tiegelwand stark ausgeprägte Wirbel und es kann die dort sehr heiße Schmelze schlechter abtransportiert werden, was sich in einer Erhöhung der Übertemperatur ausdrückt. Diese führt zu einer verstärkten lokalen Erosion des Quarzglasiegels, die unerwünscht ist.

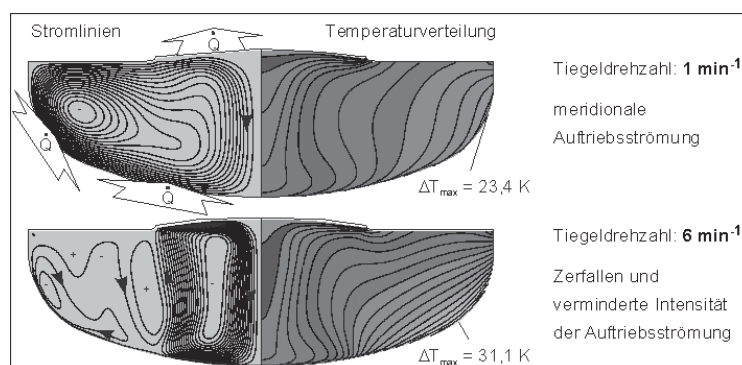


Bild 10: Vergleichsanordnung: Thermischer Auftrieb und Tiegeldrehung

Beim Übergang auf größere Kristalldurchmesser wird bei gleichbleibender Ziehgeschwindigkeit die an der Kristallisationsfront entstehende Erstarrungswärme quadratisch mit dem Durchmesser ansteigen, während die vom wachsenden Einkristall abgestrahlte Wärme linear mit dem Durchmesser zunimmt. Um unter sonst gleichbleibenden Bedingungen ein quasi-stationäres Wachstum des Kristalls zu ermöglichen, muss die Ziehgeschwindigkeit umgekehrt proportional zum vergrößerten Durchmesser verringert werden. Die Temperaturverteilung in der Schmelze wird also direkt an der Kristallisationsfront durch den Wärmetransport im Kristall und durch die freiwerdende Erstarrungswärme bestimmt. Anders ausgedrückt heißt das aber auch, je kleiner die Ziehgeschwindigkeit ist, desto größer muss die von der Schmelze zufließende Wärme sein, damit der eingestellte Wärmefluss im Kristall eingehalten werden kann. Demnach stellen sich bei kleineren Ziehgeschwindigkeiten an der Erstarrungsfront in der Schmelze höhere Temperaturgradienten ein. Die industrielle Züchtungspraxis zeigt, dass in solchen Fällen das Kristallwachstum stabil ist. Bei höheren Ziehgeschwindigkeiten muss mit entsprechend kleineren Temperaturgradienten gearbeitet werden, wobei jedoch das Wachstum instabil werden kann. Verantwortlich hierfür ist eine hydrodynamisch-thermische Instabilität, die genauer analysiert worden ist. So ließ sich für die maximale Ziehgeschwindigkeit, bei der noch ein stabiles Kristallwachstum möglich ist, und die in der Fachsprache *Ziehbarkeit* genannt wird, ein Kriterium entwickeln, das auf den Eigenschaften des hydrodynamischen Feldes in der Nähe der Kristallkante beruht. Dieses hydrodynamische Feld lässt sich durch eine charakteristische Strömungsgeschwindigkeit beschreiben, die durch die Rotationsraten von Tiegel und Kristall ebenso beeinflusst wird wie von der elektromagnetisch induzierten Konvektion. Daneben beeinflusst der radiale Temperaturgradient an der Kristallkante die Stabilität des Kristallwachstums in der Weise, dass möglichst hohe Werte wünschenswert sind.

Zur Beurteilung der Wirkung der EM-Felder waren somit geeignete Vergleichswerte mit engem Bezug zu den Anforderungen an den Ziehprozess und die Kristallqualität heranzuziehen. Dazu zählen aus ökonomischen Gründen eine möglichst hohe Ziehgeschwindigkeiten ebenso wie ein ausreichend hoher Wert für den radialen Temperaturgradienten an der Kristallkante, der die Stabilität des Wachstumsprozesses mitbestimmt. Auch die Verteilung bestimmter Kristalldefekte sowie der Sauerstoffgehalt im wachsenden Kristall waren zu beachten.

Wegen der komplizierten gegenseitigen Abhängigkeit und der Nichtlinearität der Vorgänge in der Schmelze wurde für jedes der ausgewählten EM-Felder eine größere Anzahl an Werten für die Einflussparameter untersucht. Die betrachteten Parameter umfassen die Tiegeldrehzahl, die Kristalldrehzahl, die elektrische Durchflutung der Magnetfeldspulen sowie die Frequenz des Induktorstroms [1]. Insbesondere wurde das Zusammenwirken von azimuthaler und meridionaler Schmelzenströmung sowie der Wärmetransport in der Umgebung der Kristallkante analysiert.

In Bild 11 sind die verschiedenen Wirkungen elektromagnetischer Wechselfelder in der Schmelze von CZ-Anlagen schematisch dargestellt. Bild 12 zeigt für das Beispiel eines Bodeninduktors wie der radiale Temperaturgradient an der Kristallkante abhängig von der Tiegeldrehzahl und vom Induktorstrom vergrößert und damit die Stabilität des Prozesses

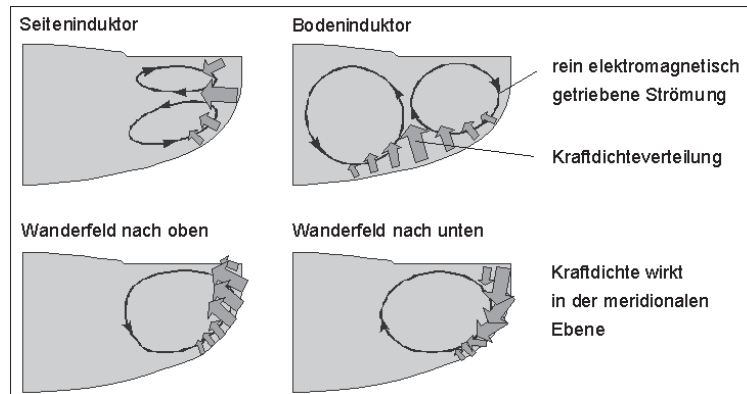


Bild 11: Wirkung elektromagnetischer Wechselfelder

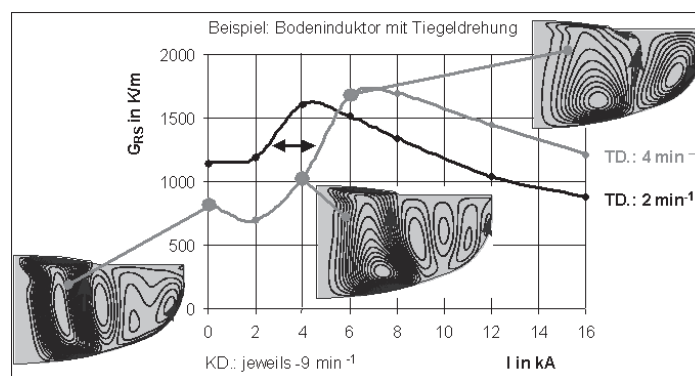


Bild 12: Radialer Temperaturgradient an der Kristallkante

verbessert werden kann. In Bild 13 ist für eine Kristalldrehzahl von $-9 \text{ }^{\circ}/\text{min}$ und eine Tiegeldrehzahl von $+4 \text{ }^{\circ}/\text{min}$ der radiale Temperaturgradient abhängig vom Induktorstrom eines Bodeninduktors jenem für das *Wanderfeld nach unten* gegenübergestellt. Im Gegensatz zum Bodeninduktor, der infolge seiner Kraftdichteverteilung einen sehr intensiv strömenden inneren Wirbel aufweist, bewirkt das *Wanderfeld nach unten* im inneren Schmelzenbereich keine ausgeprägte Strömung. Diese Struktur führt letztlich zu hohen Werten für den radialen Temperaturgradienten an der Kristallkante mit einem Maximum, das 25% über dem vergleichbaren Wert für den Bodeninduktor liegt.

Bei 300 mm- Kristallen steigen auch die Anforderungen an den Transport des aus dem Quarzglasiegel stammenden Sauerstoffs zum wachsenden Kristall. Dieser in das Kristall-

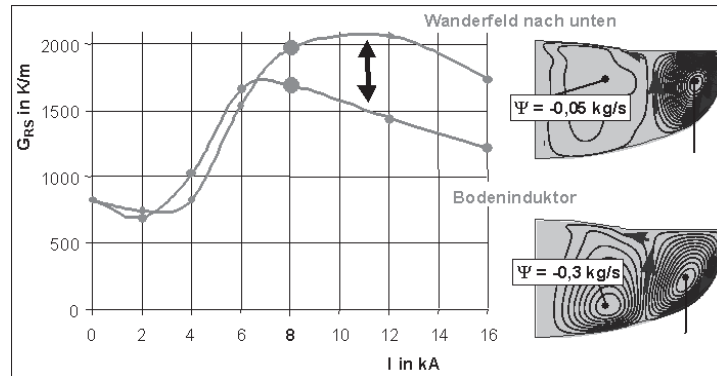


Bild 13: Radialer Temperaturgradient an der Kristallkante

gitter eingebaute Sauerstoff bildet die Basis für die Entstehung von Oxidpräzipitaten, die bei der Fertigung von integrierten Schaltkreisen zum internen Gettern von Schwermetallatomen dienen. Je nach Herstellungsprozess werden unterschiedliche Anforderungen an die Sauerstoffkonzentration bei der Kristallzüchtung gestellt. Es ist daher notwendig, den Sauerstoffgehalt im Kristall in einem gewissen Bereich einstellen zu können. Wie die Sauerstoffkonzentration im Kristallzentrum bei Anwendung eines Bodeninduktors durch geeignete Kombination von Tiegeldrehzahl und Induktordurchflutung über das sich einstellende Strömungsmuster erhöht werden kann, ist in Bild 14 dargestellt.

Bild 15 vermittelt einen Eindruck von der Mächtigkeit der 300 mm CZ- Kristalle mit einem Gewicht von 300 kg, während Bild 16 einen prozessierten Wafer mit einem Durchmesser von ebenfalls 300 mm zeigt.

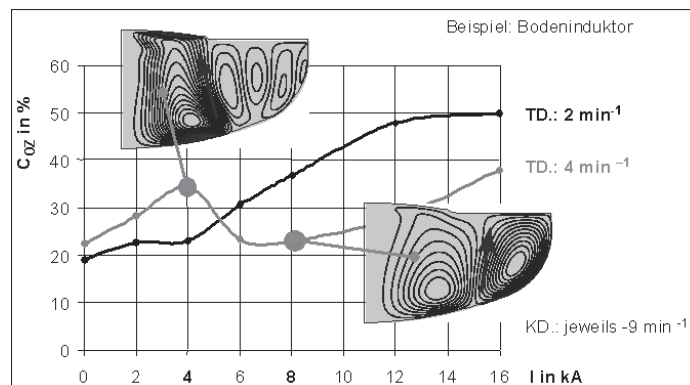


Bild 14: Sauerstoffgehalt im Kristallzentrum

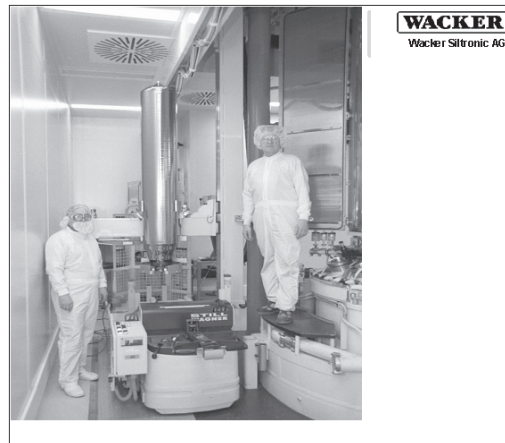


Bild 15: 300 mm CZ- Si- Kristall von 300 kg Gewicht

Czochralski Process:
300 mm – Wafer

Large diameter wafers
for the next generation
of microelectronic
circuit production



Bild 16: Prozessierter 300 mm- Wafer

Insgesamt liefern die gewonnenen Erkenntnisse, zusammen mit den Simulationsergebnissen, ein anschauliches Bild von den Vorgängen in der Schmelze unter dem Einfluss von regelbaren EM- Wechselfeldern. Die Auswahl bestimmter Kombinationen der elektrischen Durchflutung in den Induktoren und der Tiegeldrehzahl ist ganz entscheidend für die Gewährleistung günstiger Wärmetransportverhältnisse in der Umgebung des wachsenden Kristalls im Hinblick auf hohe Ziehgeschwindigkeiten bei stabilem Wachstum (Ziehbarkeit). Einige Feldtypen erweisen sich als besonders vielversprechend, da sich mit ihnen neben der Steigerung der Ziehgeschwindigkeit auch der Sauerstoffgehalt im Kristall erhöhen und seine axiale Homogenität verbessern lassen.

1.3 Weiterarbeit

Ein weiterer Schritt bei der Entwicklung der Simulationsprogramme für den CZ- Prozess ist die Einbeziehung transienter Vorgänge. Insbesondere durch die Analyse von Fluktuationen der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit unter der Kristallisationsfront können weitergehende Aussagen zur Stabilität des Ziehprozesses abgeleitet werden. Um einen Zusammenhang zwischen diesen Fluktuationen und der Versetzungsbildung herzustellen, bedarf es der Weiterentwicklung der physikalischen Vorstellungen und der mathematischen Modelle. Eine enge Verknüpfung der numerischen Simulation mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen ist hierfür unabdingbar.

Dreidimensionale Simulationsprogramme werden derzeit für die Analyse unsymmetrischer EM- Kraftdichteverteilungen in der Schmelze mit dem Ziel eingesetzt, eine weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses und der Kristallqualität zu erreichen. Weiterhin wird gerade im Hinblick auf eine präzisere Modellierung des Sauerstofftransports der in großformatigen Tiegeln ausgeprägt turbulent strömenden Schmelze die dreidimensionale transiente Simulation in Zukunft unerlässlich sein.

2. Floating- Zone- Prozess

Auch für das *Floating- Zone-* Verfahren, bei dem unter Argonatmosphäre der polykristalline Vorratsstab mittels eines flachen einwindigen HF- Induktors mit Hilfe der needle-eye-Technik aufgeschmolzen und die entstehende Schmelzzone stabil gehalten wird (Bild 17), hat sich die Prozesssimulation als wichtiges Werkzeug für die Weiterentwicklung und Verbesserung des tiegelfreien Prozesses etabliert [3].

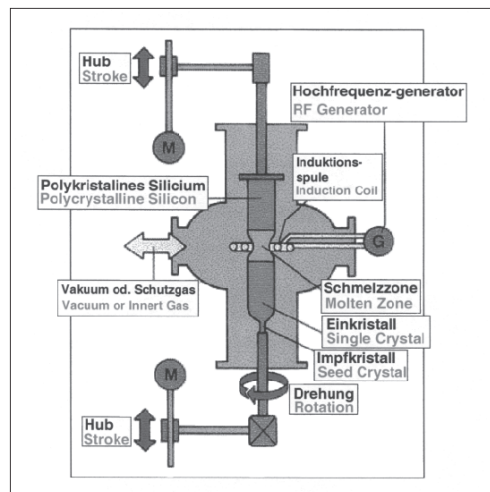


Bild 17: Floating- Zone Ziehanlage, schematisch

2.1 Modellierung und Simulation

Die zu lösende komplexe Optimierungsaufgabe mit den zu behandelnden Problemen ist in Bild 18 skizziert, die entwickelte Modellkette zeigt Bild 19 im Überblick. Für eine sinnvoll gewählte Anfangsgeometrie der Zone werden in einem ersten Schritt das HF- Feld und die Wärmequellendichte im Silizium berechnet. Anschließend das sich ergebende Temperaturfeld ermittelt und letztlich die sich einstellenden Phasengrenzen der flüssigen Zone bestimmt. Dabei werden die stattfindenden Schmelz- und Erstarrungsprozesse berücksichtigt. Die gesamte Anordnung, bestehend aus dem rotierenden polykristallinen Vorratsstab, der flüssigen Zone und dem gegensinnig rotierenden Einkristall, wird zusam-

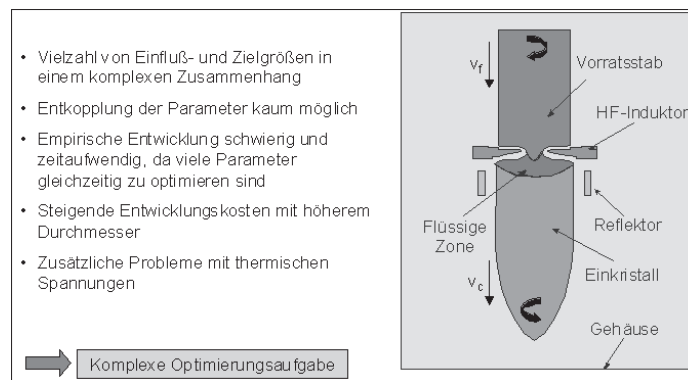


Bild 18: FZ- Prozess, schematisch

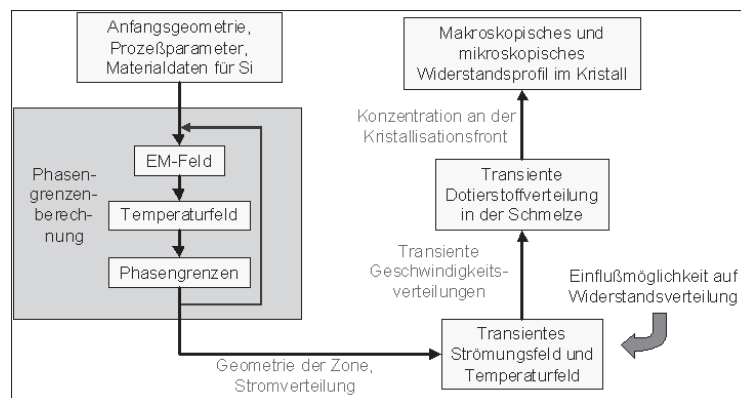


Bild 19: FZ- Modellkette

men mit dem HF- Induktor als axialsymmetrisches System behandelt. Mit der Geometrie der stabilen Schmelzzone und der berechneten Stromverteilung lässt sich dann das transiente Strömungs- und Temperaturfeld ebenso berechnen wie die sich unter der Wirkung der Konvektion einstellende transiente Dotierstoffverteilung in der Schmelze. Mit der Dotierstoffverteilung in der Konzentrationsgrenzschicht vor der Erstarrungsfront ist dann auch das makroskopische und das mikroskopische Profil des spezifischen elektrischen Widerstands im Kristall berechenbar. Die verwendeten Modelle zur Berechnung der Phasengrenzen, der Schmelzenströmung und der Dotierstoff- bzw. der Widerstandsverteilung sind in den Bildern 20, 21 und 22 dargestellt.

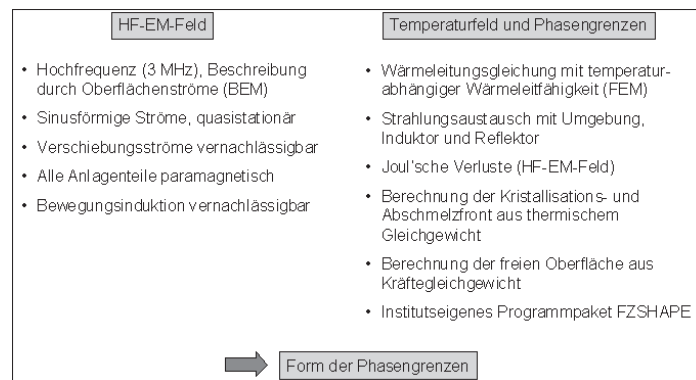


Bild 20: Modell für die Phasengrenzenberechnung

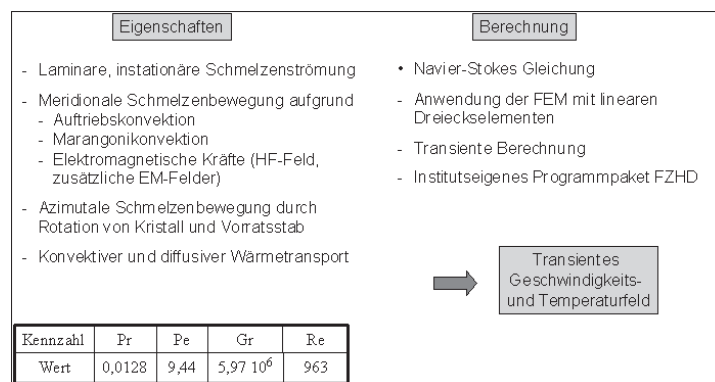


Bild 21: Modell für die Berechnung der Schmelzenströmung

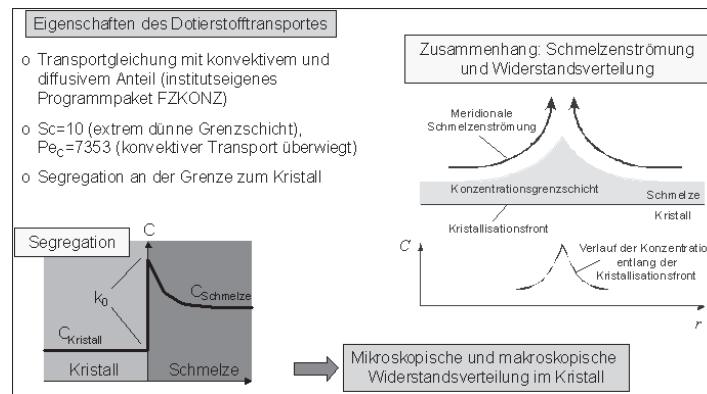


Bild 22: Modell zur Berechnung der Dotierstoffkonzentration

2.2 Ergebnisse

Einige 2D- Berechnungsergebnisse, die den im *Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin*, verwendeten Prozess zur Grundlage haben, zeigen die Bilder 23 und 24. Die für verschiedene Zeitpunkte berechneten meridionalen Strömungsmuster verursachen die Schwankungen der Widerstandsprofile, während das Zusammentreffen zweier Strömungswirbel an der Wachstumsfront zur Ausbildung von Widerstandsmaxima führt, siehe Bild 24.

Ein Vergleich der erhaltenen Ergebnisse für die Geometrie der Phasengrenzen, der Temperaturfluktuationen in der Schmelze (nur stichprobenweise möglich) und der mikroskopischen und makroskopischen Widerstandsprofile mit experimentellen Daten lieferte

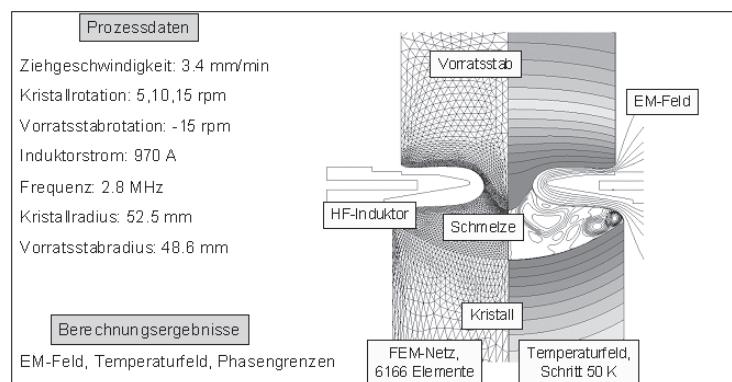


Bild 23: 2D- Berechnungsergebnisse für den IKZ- Prozess

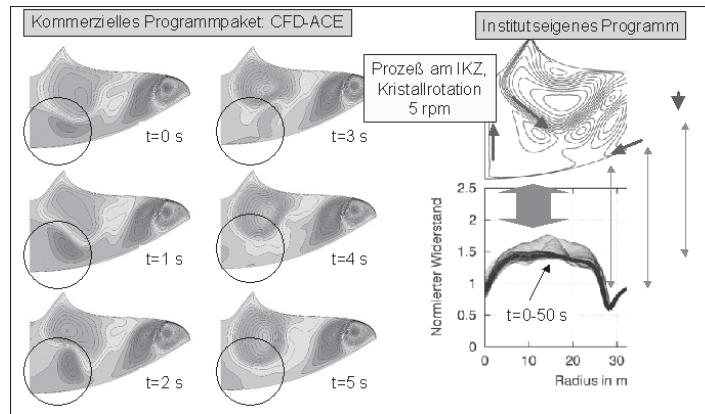


Bild 24: Charakteristische Strömung (transient) und Widerstandsprofile (2D- Ergebnisse)

eine gute Übereinstimmung (Bild 25). Damit werden die entwickelten Modelle als geeignet betrachtet, industrielle Züchtungsprozesse nachzubilden mit dem Ziel, sie weiter zu verbessern. Dies ist besonders im Hinblick auf die Herstellung von Kristallen mit großen Durchmessern von Bedeutung, da dort konventionelle Maßnahmen zur Prozessoptimierung nicht länger ausreichend sind. Auch beim FZ- Prozess sind neuartige Mittel zur Strömungsbeeinflussung erforderlich.

Eines der Ziele bei der industriellen Silizium- Kristallzüchtung nach dem FZ- Verfahren ist eine möglichst homogene Dotierstoffverteilung im Kristallvolumen und damit auch eine homogene Verteilung des spezifischen Widerstands innerhalb eines jeden Wafers. Dies gilt sowohl für das makroskopische Profil (nach der *4- Spitzen- Methode* gemessen)

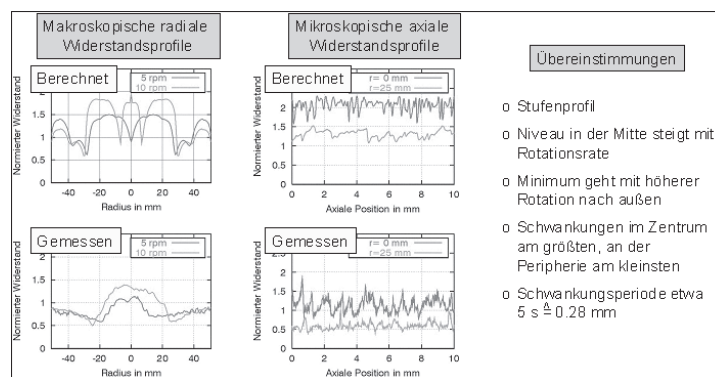


Bild 25: Vergleich berechneter und gemessener radialer Widerstandsprofile

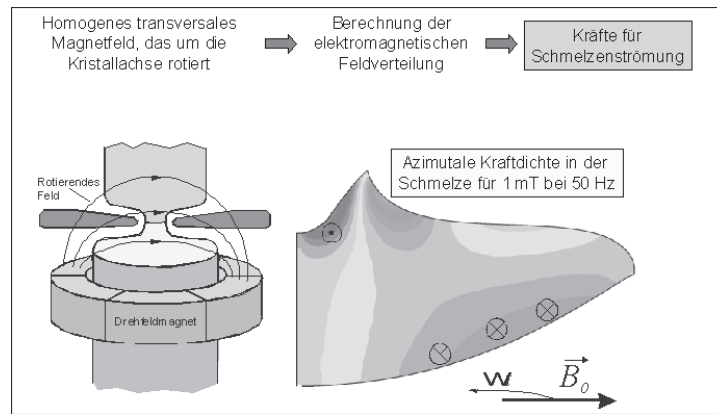


Bild 26: Berechnete Kraftdichteverteilung in der Schmelze infolge eines transversalen Magnetfeldes, das um die Kristallachse rotiert.

wie auch für die mikroskopische Verteilung (mit der räumlich hoch auflösenden *spreading-resistance-Methode* gemessen) des spezifischen elektrischen Widerstandes. Die auf den Wafern gemessenen radialen Profile des Widerstands sollen also möglichst geringe Schwankungen aufweisen und in einem ρ/r -Diagramm horizontale Linien bilden. Diese hohen Ansprüche werden von der Halbleiterindustrie deshalb gefordert, weil die charakteristischen elektrischen Kenndaten der Leistungsbaulemente unmittelbar von der lokalen Grunddotierung beeinflusst werden.

Dieser Sachverhalt gab Anlass, den Einfluss zusätzlicher EM-Felder insbesondere im Hinblick auf eine Verbesserung der Homogenität der Dotierstoffverteilung intensiv zu untersuchen. Verschiedene externe Feldtypen mit unterschiedlicher Erregung und Frequenz wurden näher betrachtet und jene Kombinationen von Parametern ermittelt [3], die das gesetzte Ziel am besten zu erreichen gestatten. Unter anderem wurde auch der Effekt eines homogenen transversalen Magnetfeldes untersucht, das um die Kristallachse rotiert (Bild 26). Ein Vergleich mit einem nachgerechneten Standardprozess, der durchaus als hochentwickelt bezeichnet werden kann, macht deutlich, dass mittels eines Drehfelds ein besonders homogenes radiales Widerstandsprofil im gewachsenen Einkristall erreicht werden kann (Bild 27). Mittels magnetfeldinduzierter Konvektion lässt sich somit auch die industrielle Herstellung von tiegelfrei gezogenen Si-Einkristallen noch deutlich verbessern.

2.3 Weiterarbeit

Die laufende Modell-Entwicklung beschäftigt sich u.a. auch mit der dreidimensionalen Behandlung des FZ-Verfahrens, die wegen des nicht axialsymmetrischen einwindigen HF-Induktors (Bild 28) angezeigt ist. Auch der in der industriellen Praxis übliche radiale Versatz der Achsen von polykristallinem Vorratsstab und Einkristall von bis zu 10 mm erfordert für die genauere Erfassung der Vorgänge eine dreidimensionale Analyse.

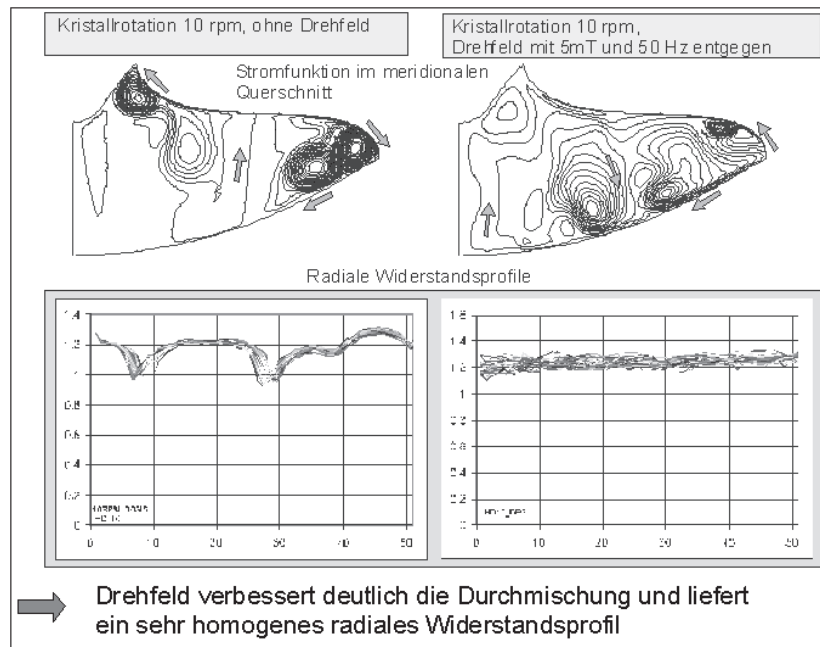


Bild 27: Schmelzenströmung und Widerstandsprofile mit und ohne Drehfeld

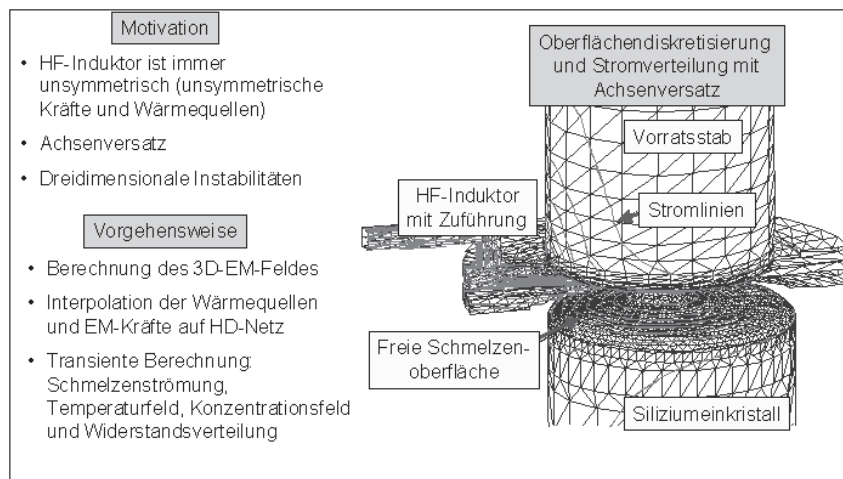


Bild 28: 3D- Stromverteilung infolge des unsymmetrischen HF- Induktors

3. Ausblick

Weitere Aufgaben bei der Bearbeitung von Problemen bei der Züchtung großer Si-Einkristalle nach dem CZ- und FZ- Verfahren beschäftigen sich insbesondere mit dem Komplex der mechanischen Spannungen im wachsenden Kristall. Dabei geht es um die Formulierung von Kriterien zur Vermeidung von Versetzungsbildung und Brucherscheinungen, aber auch um die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung des mikroskopischen Geschehens beim Kristallwachstum. Noch präzisere Aussagen zur *Ziehbarkeit* von großen Kristallen unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte sind ebenfalls von Bedeutung.

4. Literatur

- [1] WETZEL, TH., Die Schmelzenströmung im Si- Czochralski- Prozess unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder. Dissertation, Universität Hannover, VDI Verlag, Düsseldorf 2000
- [2] WETZEL, TH., A. MUIZNIEKS, A. MÜHLBAUER, Y. GELFGAT, L. GORBUNOV, J. VIRBULIS, E. TOMZIG & W. v. AMMON, Numerical model of turbulent CZ melt flow in the presence of AC and CUSP magnetic fields and its verification in a laboratory facility. J. Crystal Growth 230 (2001), 81.
- [3] RAMING, G., Modellierung des industriellen FZ- Prozesses zur Züchtung von Silizium-Einkristallen. Dissertation, Universität Hannover, VDI Verlag, Düsseldorf 2000

Bildquellen:

Bilder 1, 2, 15, 17 Wacker Siltronic AG;

Bilder 3- 14 Diss. Dr.Th. Wetzel;

Bild 16 Siemens AG;

Bilder 18- 25 Diss. Dr. G. Raming,

Bilder 26, 27 Prof. Dr. A. Muiznieks.

Der Autor dankt für die freundliche Überlassung.